

Génération et mesure de l'ozone par décharge radiofréquence

Rapport de projet 5A VSE

Etudiants :

- Guan Li
- Moreno Miguel

Tuteurs :

- Foucher Fabrice
- Masurier Jean Baptiste

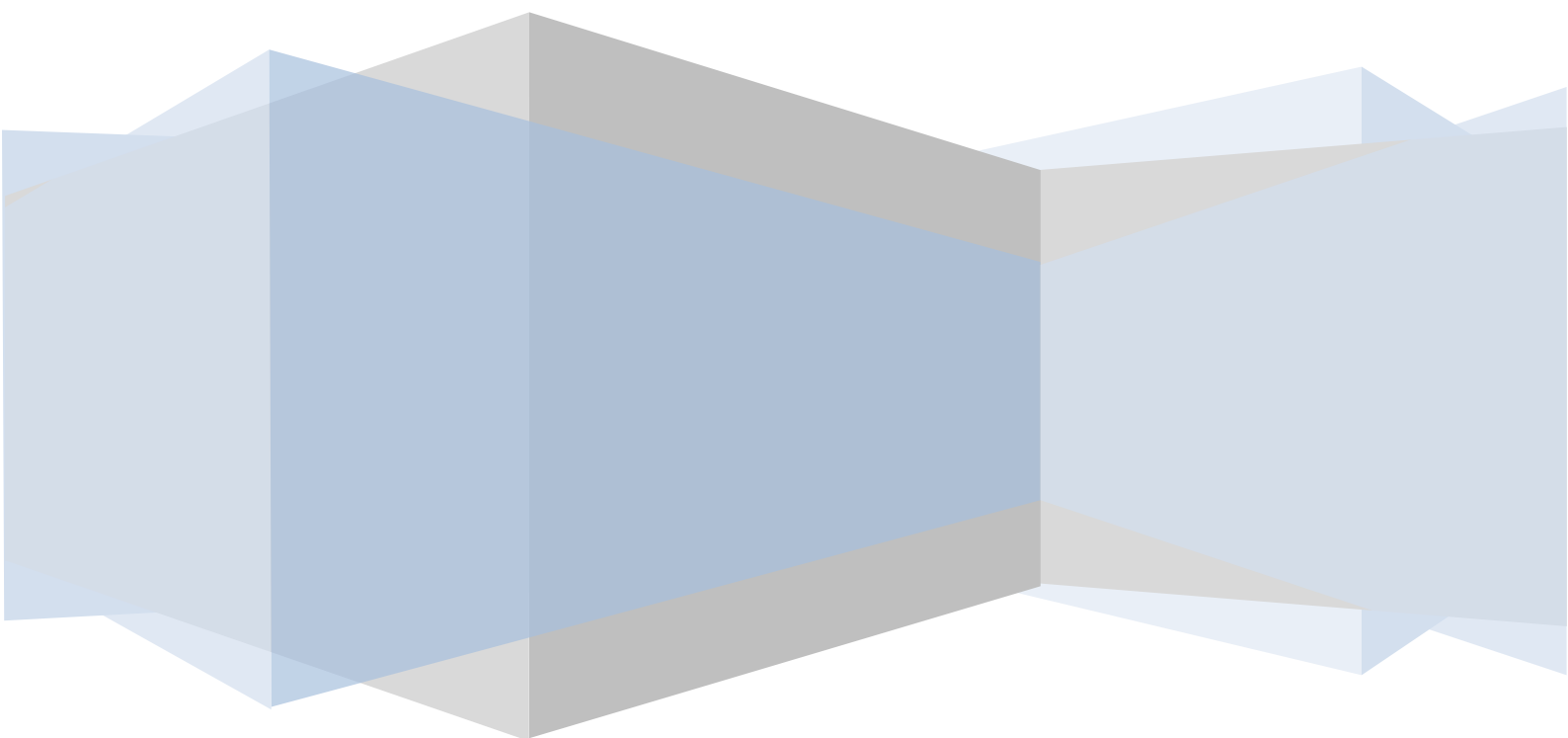


Table des matières

I.	Introduction.....	3
A.	Contexte	3
B.	Objectifs	3
C.	Plan du rapport.....	3
II.	L’ozone	4
A.	La molécule d’ozone.....	4
B.	Variables affectant la concentration d’ozone	4
1.	L’humidité.	4
2.	Température.	4
3.	Gaz d’alimentation.....	5
4.	Débit du gaz d’alimentation.....	5
5.	Fréquence de la tension d’alimentation.....	6
6.	Tension d’alimentation.	6
C.	Méthode de génération d’ozone	6
D.	Méthode pour mesurer la concentration d’ozone.....	7
III.	Simulation de l’écoulement dans le boîtier	7
A.	Variation de l’angle du col et de la vitesse d’entrée respectivement.....	8
1.	Variation de l’angle de col	8
B.	Variation de vitesse d’entrée	9
IV.	Dimensionnement du boîtier	10
A.	Mise en plan du boîtier	10
B.	Etude du matériel du boîtier	11
C.	Etude la pression à l’intérieur du boîtier	11
D.	Conception du boîtier.....	12
V.	Réalisation des essais et Résultats	13
A.	Préparation des essais.....	13
B.	Résultats	14
1.	Influence de la fréquence et du débit sur la concentration d’ozone	14
2.	Influence du gaz d’admission sur la concentration d’ozone	15
3.	Stabilisation de l’ozone généré.....	15
VI.	Conclusion	16
VII.	Perspectives	17
VIII.	Bibliographie	18
IX.	Annexe.....	19



I. Introduction

A. Contexte

Ce projet s'inscrit dans le cadre d'une application sur un moteur HCCI. Le principe de ce mode de combustion appliqué au moteur à combustion interne est le suivant. Un mélange homogène d'air et de combustible est préparé au sein de l'admission du moteur puis est admise dans la chambre de combustion. La charge est alors comprimé jusqu'à son auto-inflammation. Ce processus permet de produire un fort rendement, comparable à celui du moteur Diesel, grâce à une période de combustion extrêmement courte. Il permet aussi de générer de faibles les émissions de NO_x grâce à la basse température de combustion. Comme la combustion n'est pas pilotée par un moyen externe comme une bougie ou un injecteur, contrôler le phasage d'une combustion HCCI et son fort gradient de pression est difficile. Plusieurs stratégies ont été expérimentées sur moteur HCCI dans l'objectif de maîtriser ce mode de combustion. Une étude de P. Saisirirat et al. [1] réalisé au laboratoire Prisme a montré que l'ajout d'éthanol permet de retarder la combustion lorsqu'il est mélangé avec de n-heptane. Une autre stratégie de recherche implémentée récemment au laboratoire Prisme consiste à contrôler le phasage de la combustion en utilisant les propriétés oxydantes de certaines espèces chimiques. Dans son étude, A. Dubreuil et al. [2] a observé que l'injection d'une petite quantité de NO dans un moteur HCCI peut avancer le phasage de la combustion de quelques degrés. D'autres espèces chimiques comme par exemple l'ozone peuvent être utilisé pour modifier le phasage de combustion. Une étude réalisée par Foucher et al. [3], a montré que l'utilisation d'une faible quantité d'ozone a une forte influence sur le phasage de la combustion du n-heptane.

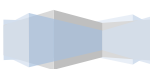
Dans le cadre des applications au laboratoire Prisme, l'ozone est fabriqué à partir d'ozoneurs fonctionnant à l'oxygène pur. Le laboratoire vient d'acquérir un nouvel ozoneur et souhaiterait l'utiliser avec de l'air en vue de proposer cette solution pour le contrôle de la combustion HCCI et pour éventuellement une future implémentation dans un véhicule automobile.

B. Objectifs

A partir du nouvel ozoneur disponible au laboratoire, l'objectif de ce projet est de concevoir un boîtier pour isoler un petit volume d'air et produire de l'ozone qui pourra ensuite être injecté à l'admission du moteur. Ensuite, des essais seront réalisés afin de caractériser cet appareil et d'établir ses performances.

C. Plan du rapport

Dans la première partie de ce projet une étude bibliographique sur l'ozone et sa génération a été réalisé afin de connaître les différentes propriétés de cette molécule. La deuxième partie de ce projet se concentre sur la simulation d'un boîtier pouvant répondre à nos objectifs. A l'aide du logiciel Ansys Fluent et quelques informations initiales, différentes formes du boîtier ont été simulées afin d'optimiser l'écoulement d'air dans le volume isolé. A partir des résultats obtenus avec la simulation, l'étape suivante consistera à définir la géométrie du boîtier. Ensuite, la fabrication est le montage pourra être réalisé en tenant compte des différentes caractéristiques fixées en terme de matériau, de pression, de température et par rapport aux propriétés de l'ozone. Finalement, une série d'expériences et de mesures seront réalisées afin de caractériser les performances de ce nouvel ozoneur.



II. L'ozone

A. La molécule d'ozone

La molécule d'ozone est composée de trois atomes d'oxygène. Elle est formée à partir de trois molécules d'oxygène dont l'une reçoit de l'énergie, se dissociant en deux atomes qui vont se recombinaison avec les molécules d'oxygène pour former de l'ozone (Figure 1).

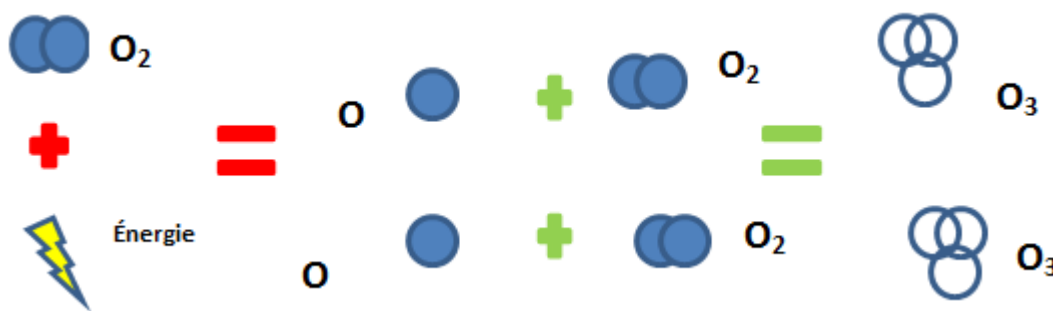


Figure 1. Formation de l'ozone

Les forces d'attraction entre les atomes de cette molécule sont très faibles et la rendent instable. C'est la raison pour laquelle l'ozone ne peut être stocké et doit être généré dans le cadre d'une application. De plus, l'instabilité de l'ozone lui donne la caractéristique d'être très oxydante et elle cèdera facilement l'un de ses atomes d'oxygène permettant l'oxydation d'autres composés. C'est pourquoi elle est utilisée dans des applications comme la désinfection et le traitement des bactéries.

B. Variables affectant la concentration d'ozone

Les différentes recherches menées sur la molécule d'ozone ont montrées que sa concentration peut être affectée par plusieurs variables. Les variables influençant la molécule sont présentées ci-après.

1. L'humidité.

La teneur en eau, présente dans le gaz d'alimentation peut affecter de manière significative la concentration de l'ozone en provoquant une diminution de celle-ci.

2. Température.

La molécule d'ozone est instable dans des environnements à fortes températures (supérieures à 50 °C), ce qui va dégrader la production d'ozone. Ainsi, pour un fonctionnement efficace d'un dispositif, il est préférable de maintenir une température

inférieure à 50 °. L'effet de la température sur la demi-vie de l'ozone, est montré dans une étude de McClurkin [5]. (Figure 2.)

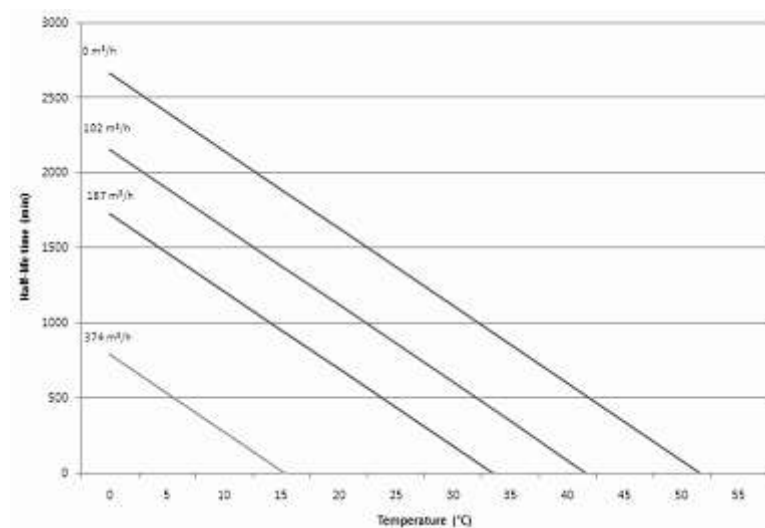


Figure 2. Effet de la température sur la demi-vie de l'ozone

3. Gaz d'alimentation

La formation de la molécule d'ozone est réalisée à partir d'oxygène. Le gaz d'admission peut donc avoir une forte influence sur la concentration d'ozone comme le montre la Figure 3.

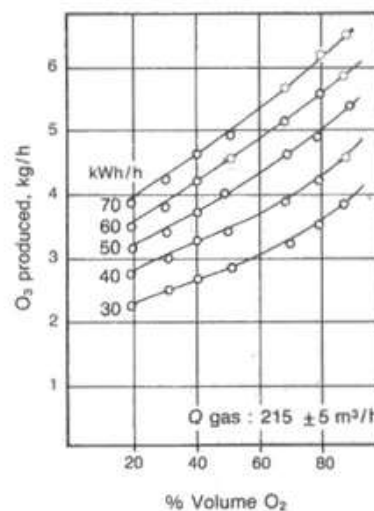


Figure 3. influence de la concentration en oxygène sur la production d'ozone à différents courants électriques

4. Débit du gaz d'alimentation

Une augmentation du débit du gaz permet une augmentation de la vitesse des molécules passant à travers l'espace où l'ozone peut être produit, ce qui réduit la probabilité que ces molécules soient fabriquées.



Dans l'étude de E.Beutelpacher [4] sur la formation d'ozone par décharge radio fréquence on a trouvé la influences des paramètres qui sont intéressante par rapport à notre étude, tels que :

5. Fréquence de la tension d'alimentation.

Si la fréquence augmente, le nombre de molécules d'oxygène qui va être dissocié et produire de l'ozone va être Supérieur. Cela est dû à un plus grand nombre de périodes de micro-décharges par unité de temps, ce qui favorise la formation de molécules d'ozone.

6. Tension d'alimentation.

Augmenter l'amplitude de la tension d'alimentation permet d'avoir une plus grande concentration d'ozone. Ce comportement est dû à une plus grande intensité du champ électrique dans la cellule, ce qui permet une plus grande ionisation du gaz alimentée et un plus grand nombre de réactions chimiques pour la formation d'ozone.

C. Méthode de génération d'ozone

Il existe plusieurs méthodes pour mesurer l'ozone, décharge électrique, le rayonnement UV et l'électrolyse. Dans le cas de ce projet, l'ozoneur mis à disposition fonctionne sur le principe d'une plaque à décharges électriques (Figure 5).



Figure 4. Plaquette ozoneur utilisé.

Le principe de fonctionnement est schématisé par la Figure 6. Une alimentation produit un signal électrique entre chaque borne de la plaque à décharges électriques mesuré de $V_{cc}=8$ kV avec une fréquence de 20kHz. Ce signal permet la création d'un champ électrique intense produisant de l'ozone à partir du débit d'air admis.



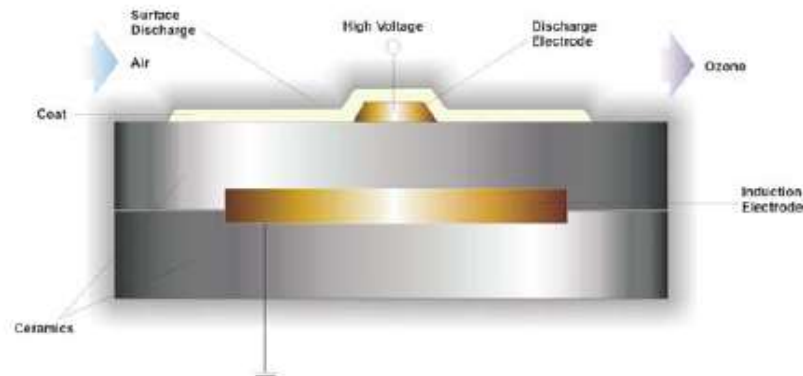


Figure 5. Schema de fonctionnement du ozoneur donnée par le fournisseur

D. Méthode pour mesurer la concentration d'ozone

Actuellement, il existe plusieurs méthodes pour mesurer la concentration d'ozone comme la colorimétrie ou les capteurs à semi-conducteur. Pour notre étude, l'absorption d'UV sera utilisée.

L'absorption de la lumière UV par l'ozone peut être utilisée pour mesurer la concentration de l'ozone dans un gaz ou un liquide. Cette technique consiste à mesurer l'atténuation d'un faisceau de lumière UV avec une longueur d'onde de 254 nanomètres ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$) dans une cellule d'absorption, qui contient un échantillon de gaz ou de liquide. La concentration d'ozone est déterminée en comparant l'intensité lumineuse mesurée à partir de l'échantillon avec la mesure de référence (Figure 6).

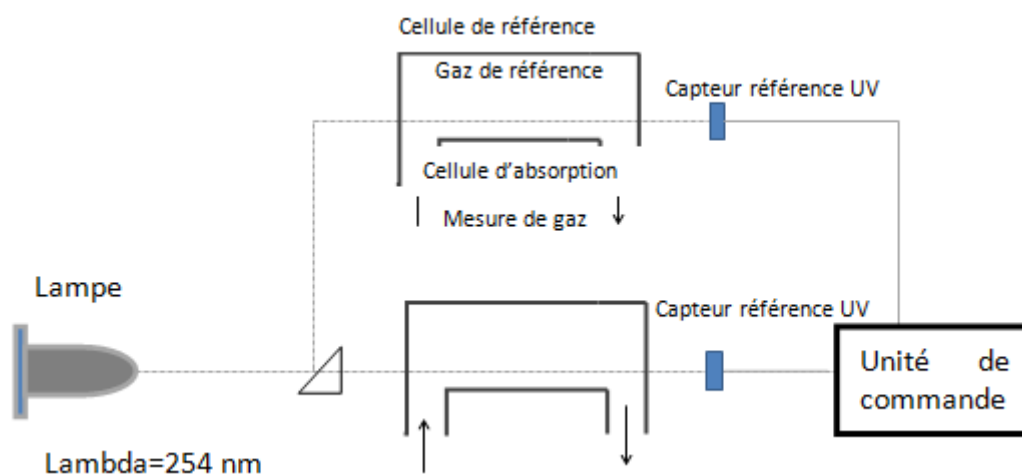


Figure 6. Mesure de l'ozone par absorption d'UV

III. Simulation de l'écoulement dans le boîtier

L'objectif de cette partie est d'optimiser la forme du volume traversant l'ozoneur de telle sorte à obtenir la meilleure répartition de vitesse dès que l'écoulement arrive au-dessus de la plaque à décharges électriques et pouvoir exploiter tout l'ozone généré.



Afin de répartir au mieux l'écoulement, il a été décidé de mettre en place un divergeant. En considérant les paramètres géométriques de la plaque, $50 \times 130\text{ mm}$, et les paramètres géométriques des matières premières pouvant être utilisées, $300 \times 300\text{ mm}$, le paramètre qu'il a été choisi de faire varier est l'angle du divergeant. En tenant compte que l'entrée et la sortie du boîtier devrait se faire sur un diamètre de 4 mm , d'une symétrie entre l'entrée et la sortie et d'une symétrie sur la longueur de l'écoulement, un calcul a permis de déterminer que l'angle minimal de ce divergeant pourrait être de 15.8° en suivant la Figure 7.

Le débit d'entrée peut être un autre facteur influent sur l'écoulement. Il a donc été aussi étudié dans cette partie. A partir des données techniques de l'ozoneur où le débit maximal pouvant être admis est de 5 L/min et connaissant le diamètre d'entrée, la vitesse d'entrée pour la simulation pourra varier entre 0 et 6.2 m/s .

A l'aide d'un calcul du nombre de Reynolds, il a été déterminé que l'écoulement serait turbulent. Donc, les simulations effectuées seront réalisées en utilisant un modèle turbulent.

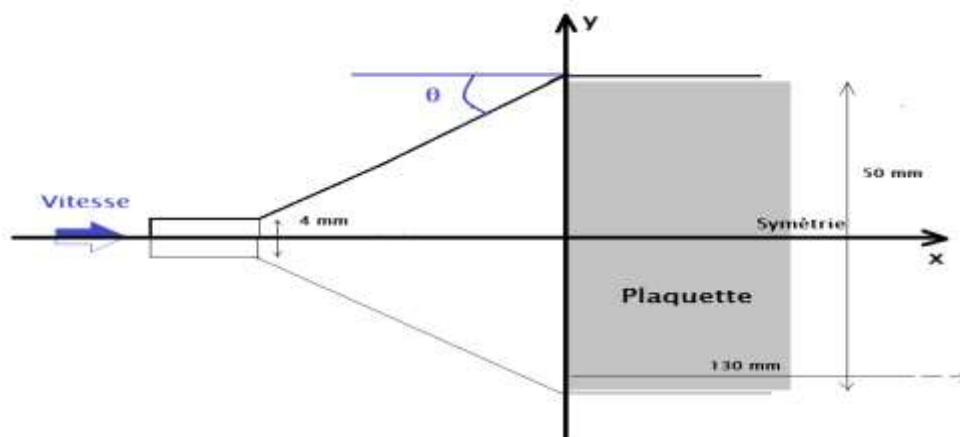


Figure 7. Schéma de plaque

A. Variation de l'angle du col et de la vitesse d'entrée respectivement

1. Variation de l'angle de col

Variation de l'angle de col à vitesse 5 m/s

Dans un premier temps, les simulations ont été réalisées pour différents angles du divergent. La figure X présente un exemple de champ de vitesse pour un angle 20° , les autres simulations sont disponibles en ANNEXE. Il a été étudié le profil de vitesse suivant l'axe y et à l'entrée de la plaque. Les résultats sont présentés sur la figure 9.



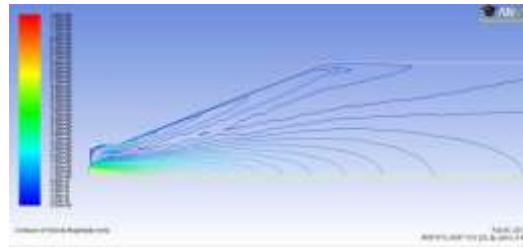


Figure 8. Variation de l'angle

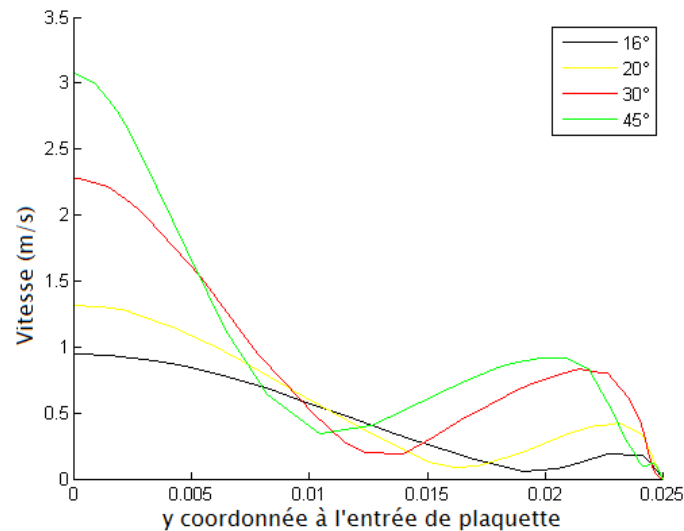


Figure 9. Champ de vitesse à l'entrée de plaque

Les résultats montrent qu'il est nécessaire d'avoir un angle le plus petit possible pour éviter d'avoir des zones de recirculation comme le montre les bosses sur le profil de vitesse pour les angles de 30° et 45°. Toutes fois, il n'est pas possible d'envisager un angle de 16° car il faut prendre en compte la possibilité d'avoir un raccord en entrée, l'angle choisis sera donc de 20°.

B. Variation de vitesse d'entrée

Variation de vitesse à l'angle 20°

Compte tenu d'un angle de 20° d'autres simulations en faisant varier la vitesse d'entrée ont été réalisés. Les résultats sur le profil de vitesse en l'entrée de la plaque sont présentés par la figure 10.



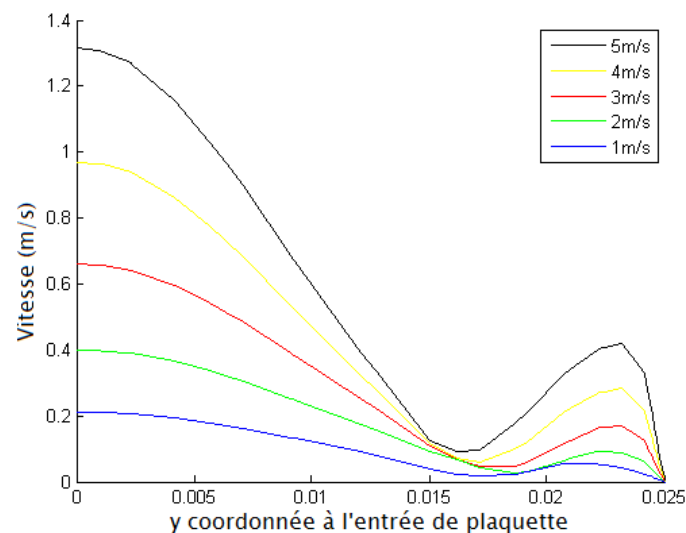


Figure 10. Champ de vitesse au début de plaque

Les résultats observés sur les profils de vitesse permettent de conclure que lors de nos essais, il sera nécessaire d'utiliser un faible débit pour utiliser la totalité de l'ozone produit par la plaque à décharges électriques.

A partir des résultats de simulation, le dimensionnement du boîtier a été mis en place.

IV. Dimensionnement du boîtier

A. Mise en plan du boîtier

A partir des résultats obtenus avec la simulation, particulièrement de l'angle du divergeant, et d'un logiciel de CAO, le plan du boîtier accueillant la plaque à décharges électriques a été dessiné (Figure 11).

Le boîtier se compose de deux parties, la pièce à droite sur la figure correspond à la partie principale où la plaque va être située et la pièce à gauche de la figure est le couvercle qui permettra de fermer et isoler le volume d'air pour produire de l'ozone.

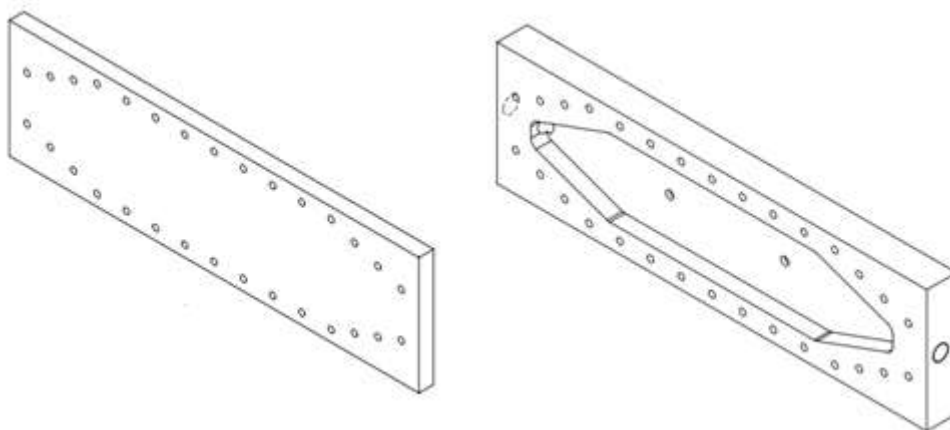


Figure 11. Perspective du couvercle et du bloc ozoneur
























De chaque côté de la partie principale, un espace suffisant a été laissé pour permettre l'introduction d'un raccord fileté : un pour l'admission et l'autre pour la sortie du gaz contenant l'ozone. De plus, deux trous ont été percés dans le fond de la pièce pour les connexions électriques de la plaque avec son générateur haute tension. Les plans avec les dimensions du boîtier sont disponibles en Annexe.

B. Etude du matériel du boîtier

A partir du dimensionnement, il a été nécessaire de choisir un matériau pour la fabrication du boîtier. Dans le cadre de son utilisation, le boîtier fonctionnera à température ambiante mais pourra éventuellement monter à 200 °C. De plus, il devra aussi tenir à une pression pouvant aller jusqu'à 2 bars. Ainsi, plusieurs caractéristiques doivent être prises en considération : une bonne résistance à l'ozone, une bonne résistance mécanique, une bonne tenue en température et une faible conductivité électrique. Les matériaux répondant à ces critères sont résumés dans le tableau suivant.

Table 1. Propriétés des matériaux par rapport à l'ozone

Matériel	Résistance à l'ozone	Résistance à la température	Résistance mécanique	Isolation électrique
PTFE(Téflon)		<260°C		
Polyoxyméthylène(PO M)		<170°C		
Peek		<250°C		
Polycarbonate		<120°C		
PVC		<60°C		
Polyuréthane		<70°C		

	Excellent
	Acceptable
	Mauvais

Idéalement les deux matériaux qui répondent le mieux aux exigences fixées sont le Peek et le Téflon. Pour ce projet, le choix s'est porté sur le Téflon.

C. Etude la pression à l'intérieur du boîtier

Afin de permettre l'étanchéité entre le couvercle et la partie principale et d'assurer une bonne fermeture du volume du boîtier, une étude de la pression a été réalisée pour décider du nombre de vis nécessaire à cette fermeture. Le choix a été de mettre 30 vis



reparties de manière symétrique et l'étude a été effectuée pour montrer que ce nombre est suffisant.

Il a été supposé que la pression maximale dans le boîtier pourrait être de 2 bars.

En prenant l'équation suivante : $P = \frac{F}{S}$

Et en calculant la surface qui est soumise à la pression de l'air agissant sur le couvercle comme la somme de trois surfaces différentes :

$$S = \left((130 * 50) + 2 * \left(\frac{50 + 13,5}{2} * 50,141 \right) \right) * 10^{-6} = 9,7 \text{ mm}^2$$

Il est possible d'obtenir la force exercée par l'air :

$$F = S * P = 200 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{mm}^2} * 9,7 \text{ mm}^2 = 1,94 \text{ kN}$$

En divisant par le nombre de vis, La force exercée sur chaque vis donne :

$$F_v = \frac{F}{30} = 0,647 \text{ kN}$$

Et donc, avec la surface en contact avec la vis la contrainte de traction :

$$\sigma = \frac{F_v}{S} = \frac{F_v}{\pi \left(\frac{D^2}{4} \right)} = \frac{0,6567}{\pi \left(\frac{0,004^2}{4} \right)} = 52,25 \text{ Mpa}$$

En se référant à un catalogue pour obtenir la contrainte maximale et la comparer, on peut obtenir un facteur de sécurité étant le rapport entre la contrainte calculée et la contrainte maximale.

$$\sigma_{\text{max}} = 628,82 \text{ Mpa} \gg 52,25 \text{ Mpa}$$

Facteur de sécurité: $\gamma = 12,03$

D. Conception du boîtier

Finalement, la fabrication du boîtier a pu être lancée mais dû à l'indisponibilité de Téflon ou de Peek à l'atelier, le choix de matériau s'est porté sur un autre matériau disponible : le polyoxyméthylène. Le résultat suite à sa fabrication est présentée Figure 12 et l'assemblage avec la plaque à décharges électriques en Figure 13.





Figure 14. Boîtier après l'usinage

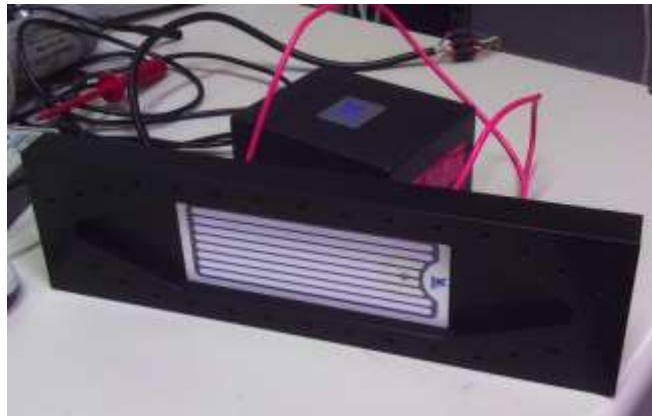


Figure 15. Assemblage du bloc ozoneur

V. Réalisation des essais et Résultats

A. Préparation des essais

Pour tester ce nouvel ozoneur, une installation expérimentale a été montée (Figure 16). Un débitmètre branché à l'ozoneur fournit un débit de 5Nl/min maximum en air ou en oxygène. L'ozone est ensuite admis dans un volume tampon et mélangé avec de l'air provenant d'un autre débitmètre. Il permet de faire une dilution pour permettre à l'analyseur de mesurer la concentration en ozone qui ne doit pas être supérieure à 200ppm.

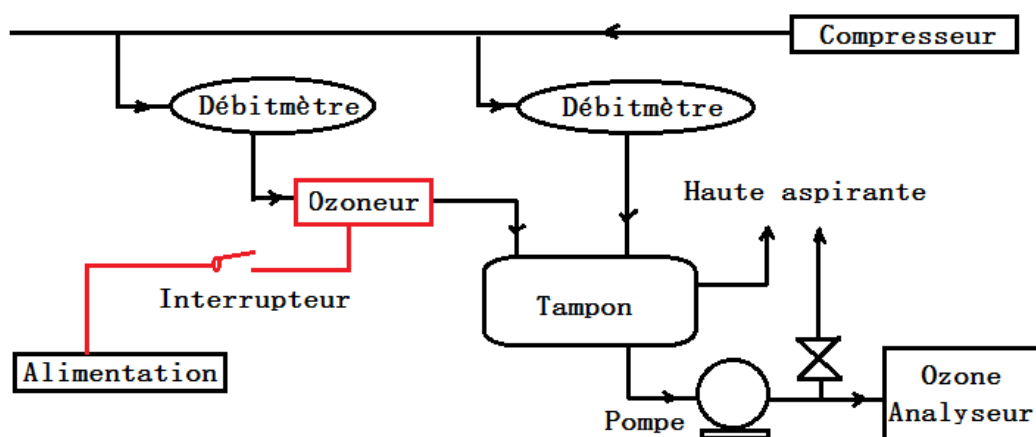
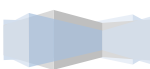


Figure 16. Circuit de système d'ozoneur

A partir de ce montage, quelques petites observations ont pu être effectuées. D'abord, la quantité d'ozone mesurée avait des difficultés à rester constante. Ensuite, une augmentation rapide de la température du boîtier a été remarquée, et finalement l'alimentation a cédé empêchant de caractériser cet ozoneur. Le problème provient probablement des transistors, des pièces de rechange n'étant pas disponibles, les essais avec ce dispositif ont été stoppés.



Toutefois, un autre ozoneur était disponible au laboratoire, il s'agit d'un ozoneur Anseros COM-AD-01 fonctionnant à l'oxygène pur mais il est souhaité de le faire fonctionner aussi à l'air. De plus, il permet de faire varier la fréquence avec un potentiomètre sous forme de pourcentage par rapport à une fréquence maximale. Les essais menés ont donc été réalisés avec le même montage et sont présentés ci-après.

B. Résultats

1. Influence de la fréquence et du débit sur la concentration d'ozone

Les premiers essais ont été effectués en faisant varier le débit d'air en entrée de l'ozoneur pour une condition de dilution et pour deux fréquences différentes 30% et 60%. Les résultats sont présentés par la Figure 17.

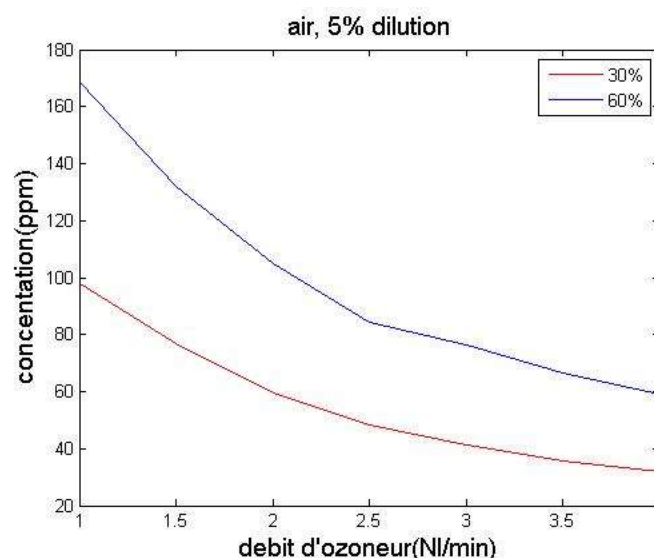


Figure 17. Influence du débit sur la concentration d'ozone

L'effet du débit sur la concentration d'ozone peut être observé. Lorsque le débit augmente, la concentration diminue. Ceci s'explique car le temps de résidence du gaz d'admission est plus court, il va donc y avoir une quantité plus faible d'oxygène qui se va transformer en ozone. Inversement, si on diminue le débit, les molécules d'oxygène vont rester plus longtemps à la surface de la plaquette et la plaquette va pouvoir produire plus d'ozone.

Les résultats obtenus montrent aussi l'influence de la fréquence sur la concentration d'ozone produite à partir de l'air. En augmentant la fréquence, le nombre de décharges par unité de temps augmente aussi, il est donc logique que pour un même débit que la concentration d'ozone soit plus élevée.



2. Influence du gaz d'admission sur la concentration d'ozone

La Figure 18 A présente la variation de la concentration d'ozone par rapport au débit, pour un pourcentage de l'ozoneur fixé à 30% et avec la même dilution. Dans la Figure 18 B, Il est possible de comparer la concentration d'ozone qui est générée avec de l'air ou avec de l'oxygène par variation de pourcentage sur l'ozoneur et une même dilution.

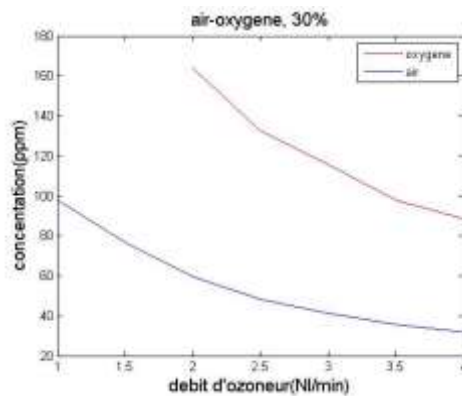


Fig. A

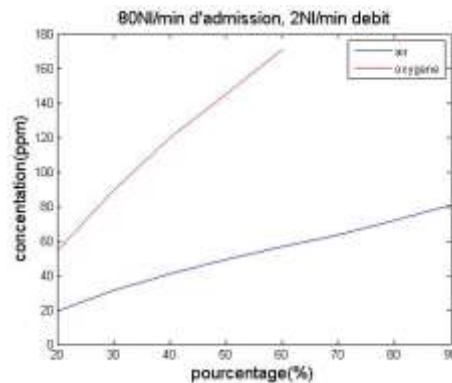


Fig. B

Figure 18. Influence du gaz d'admission sur la concentration d'ozone

Les résultats observés permettent de voir que pour un même débit, la concentration d'ozone produite à partir d'oxygène est plus élevée car la concentration d'oxygène dans l'air est plus faible. Toutefois, il n'y a pas le même rapport en concentration d'ozone que le rapport en concentration d'oxygène contenu entre les deux gaz qui devrait être de cinq, cela peut être dû à la dilution.

Finalement, dans ces essais, on peut constater qu'il est possible de fournir jusqu'à 80 ppm d'ozone avec de l'air. En tenant compte des quantités d'ozone utilisées dans l'étude de F. Foucher [3] ne dépassant pas les 50ppm, les concentrations pouvant être obtenus avec de l'air sont largement suffisantes.

3. Stabilisation de l'ozone généré

Dans cet essai, une étude de stabilité sur la quantité d'ozone mesurée a été mise en place pour une admission en air et une admission en oxygène pur dans l'ozoneur.



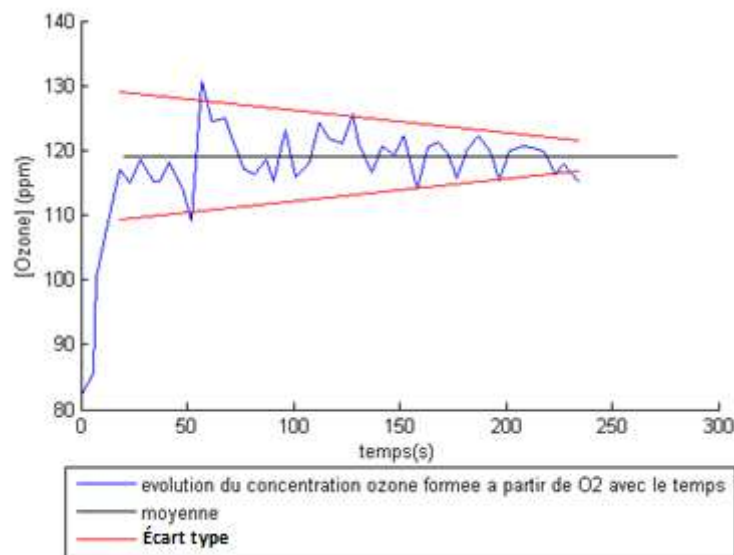


Figure 19. Stabilisation de l'ozone généré par oxygène

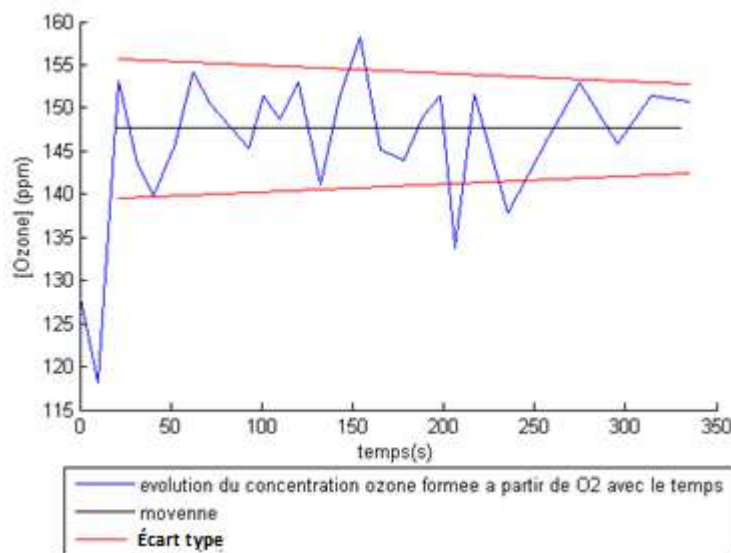


Figure 20. Stabilisation de l'ozone généré par l'air

Dans le cas de l'oxygène, il faut environ 4 min pour que la concentration en oxygène se stabilise. Dans le cas de l'air, celle-ci a des difficultés à se stabiliser et on observe un écart type autour de la moyenne plus important. Cet effet peut-être dû à la formation d'autres espèces au sein de l'ozoneur. Néanmoins, les mesures effectués ne sont pas les mêmes en terme de dilution car l'installation expérimentale n'était limité par la pression résident dans le volume tampon. Cela pour donc aussi expliquer ces écarts.

VI. Conclusion

Dans ce projet il a été réalisé la conception et la réalisation d'un boîtier pour mettre en place un ozoneur afin de le faire fonctionner à l'air. A partir d'une taille initiale de



matériel disponible, il a été réalisé des simulations afin de déterminer une forme optimale pour avoir un écoulement parfaitement établi au-dessus de la plaque à décharges électriques. Il a été déterminé que le divergent devrait avoir un angle minimal et une vitesse le plus faible possible.

Ensuite il a été réalisé une recherche de matériaux et une étude de pression afin de satisfaire les besoins et de dimensionner le boîtier. Cela a permis de fabriquer et d'assembler l'ozoneur en vue d'effectuer des essais.

Finalement, les essais réalisés avec le bloc ozoneur ont permis de faire quelques observations mais l'alimentation en tension a cédé avant les premières mesures. Un autre ozoneur a donc été utilisé pour obtenir quelques résultats. Les résultats obtenus ont permis de constater l'influence du débit, du gaz d'alimentation et de la fréquence sur la concentration d'ozone. Lorsque l'augmentation du débit permet de réduire la concentration en ozone produite tandis qu'une fréquence plus importante permet d'augmenter la concentration. Pour le gaz d'alimentation la concentration mesure dépendra de taux d'oxygène contenu dans le gaz. En fin une étude de stabilité a été réalisée et a montré dans le cas de l'air, de fortes variations peuvent être observées. De plus, les résultats obtenus avec de l'air ont démontré qu'il est possible de produire suffisamment d'ozone pour contrôler le phasage de la combustion dans les moteurs HCCL.

VII. Perspectives

En vue des observations menées au cours de simulation l'écoulement pourrait être amélioré en utilisant un diffuseur positionné en amont de la plaque à décharges électriques. Une étude a été menée et les résultats sont disponibles dans l'Annexe.

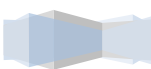
Par rapport aux observations suite aux essais avec le boîtier réalisé, un système de refroidissement devrait être utilisé pour éviter de trop fortes températures et éviter un échauffement sur la plaque.

Enfin, l'alimentation devrait être modifiée en vue de permettre une variation de la tension et de la fréquence du signal, pour donner d'autres moyens de variations de la concentration en ozone et envisager un meilleur contrôle pour une intégration dans un véhicule automobile.



VIII. Bibliographie

- [1] P. Saisirirat, C. Togbe, S. Chanchaona, F. Foucher, C. Mounaïm-Rousselle, P. Dagaut, *Proc. Combust. Inst.* 33 (2) (2011) 3007–3014
- [2] A. Dubreuil, F. Foucher, C. Mounaïm-Rousselle, G. Dayma, P. Dagaut, *Proc. Combust. Inst.* 31 (2)(2007) 2879–2886
- [3] *Influence of ozone on the combustion of n-heptane in a HCCI engine.* F. Foucher, P. Higelin, C. Mounaïm-Rousselle, P. Dagaut
- [4] *Diseño y construcción de un generador de ozono para aplicaciones de purificación de agua.* ING. Erwin Beutelspacher Santiago .ING. José María Calderón
- [5] *Half-life time of ozone as a function of air conditions and movement.* McClurkin, Maier, D.E.
- [6] *Radiospare catalogue de matériaux et d'autres dispositifs.*
<http://radiospares-fr.rs-online.com/web/>
- [7] Air-assisted fuel injector with ozone enrichment. Edward Daniel Klomp



IX. Annexe

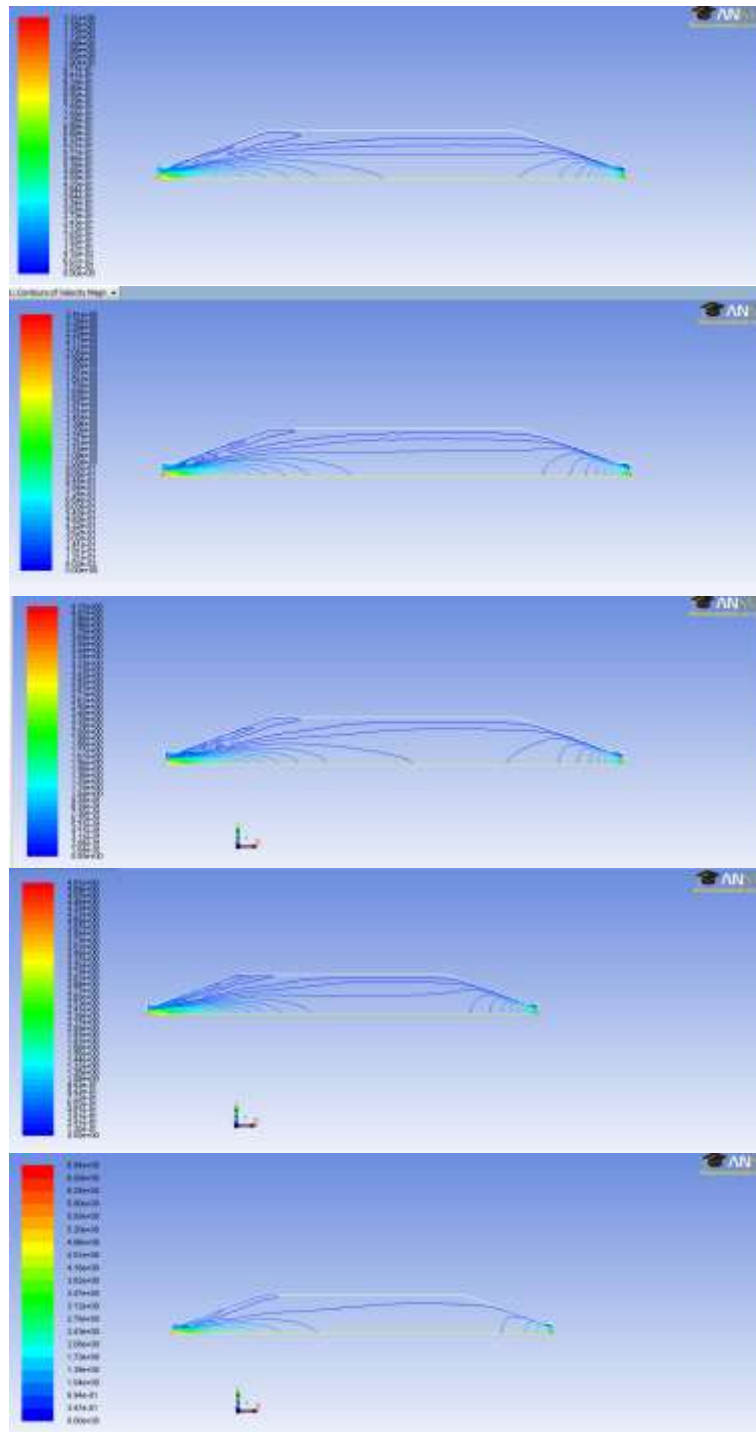
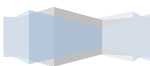


Figure 21.simulation en iso-volume pour 1m/s, 2 m/s, 3 m/s, 4 m/s, 5m/s



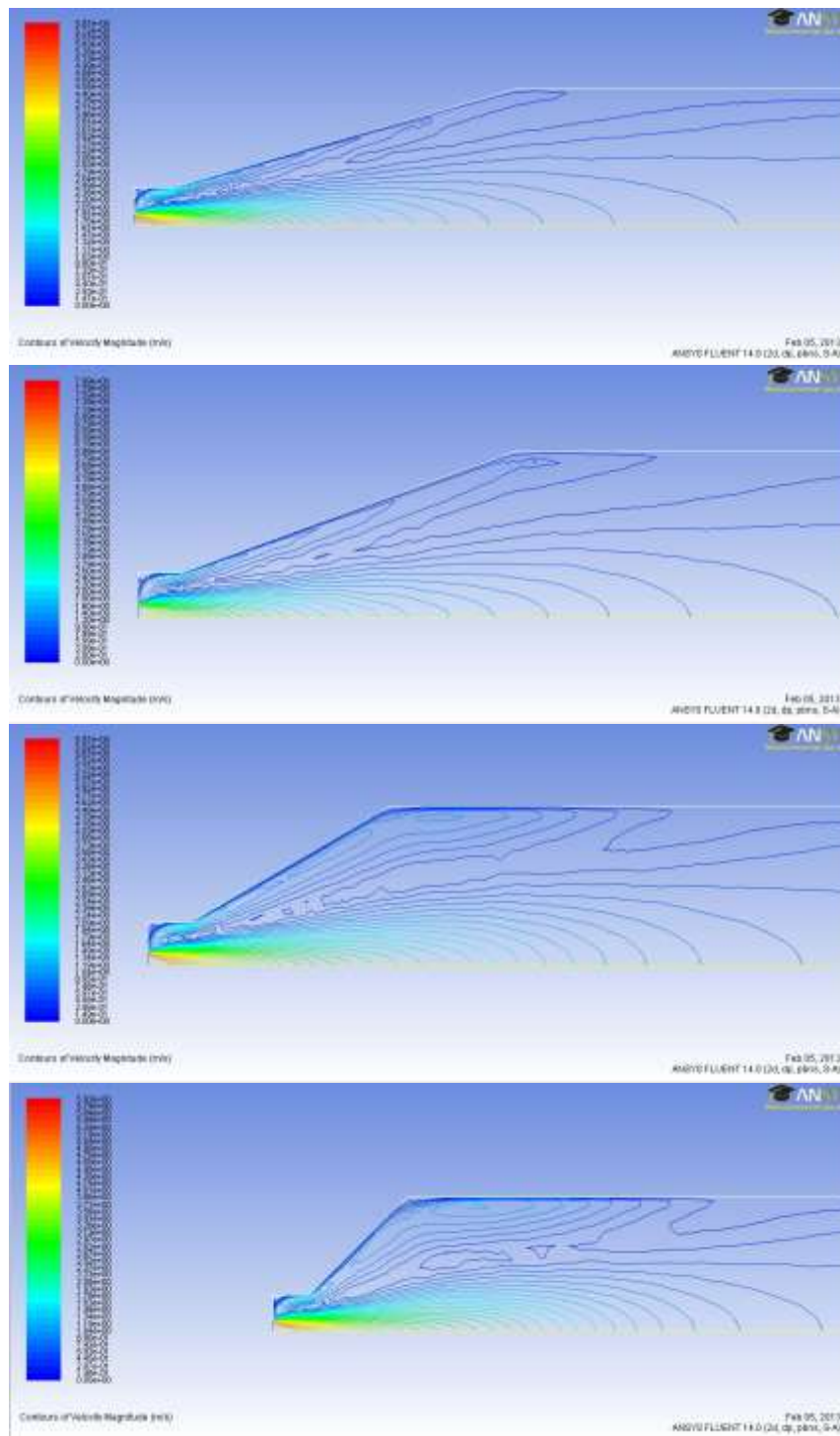
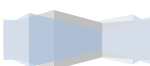


Figure 22. Variation de l'angle pour 16°, 20°, 30°, 45°



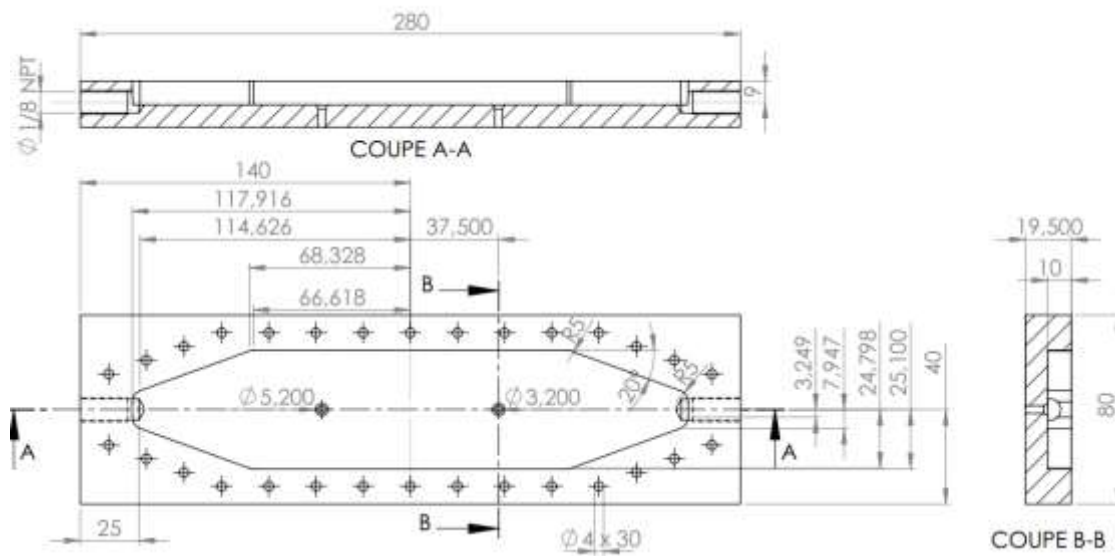


Figure 23.Mise en plan du bloc ozoneur. Distances en mm

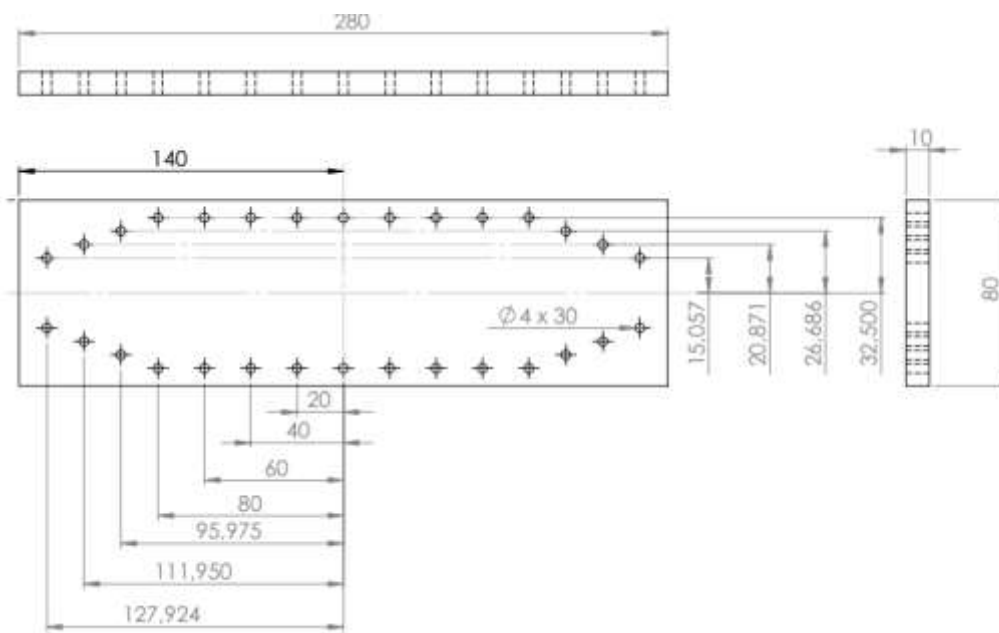
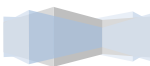


Figure 24.Mise en plan du couvercle. Distances en mm



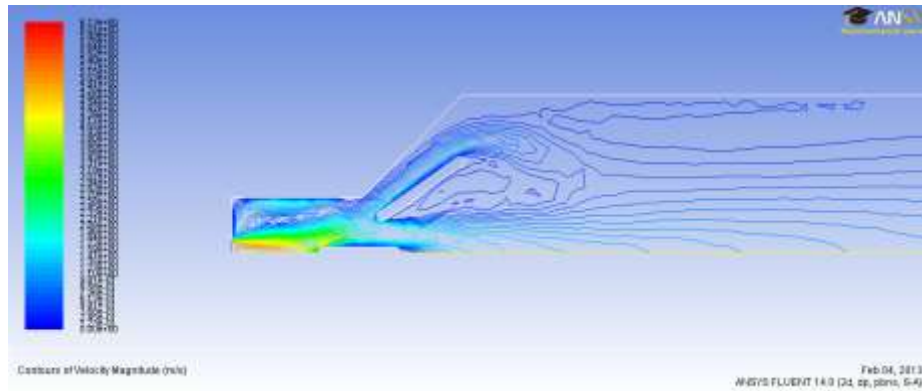


Figure 25.boitier 45° avec un diffuseur

